

# 地学基礎の授業において 乾燥断熱減率を実感するための実験装置の提案

岩崎 博之<sup>1)</sup>・武井 伸光<sup>2)</sup>

1) 群馬大学教育学部理科教育講座

2) 群馬県立伊勢崎高等学校

(2019年9月25日受理)

## A proposal of an Experimental Device to realize Dry Adiabatic Lapse Rate in Basic Earth Science

Hiroyuki IWASAKI<sup>1)</sup> and Nobumitsu TAKEI<sup>2)</sup>

1) Department of Science Education, Faculty of Education, Gunma University

Maebashi, Gunma 371-8510, Japan

2) Gunma Prefectural Isesaki High School

(Accepted on September 25th, 2019)

### 1. はじめに

理科の学習は現象や用語を暗記することに力点が置かれる傾向があり、特に地学分野ではその傾向が強い(例えば、長崎, 2014; 松森と一瀬, 2015). 特に、基礎地学では他の科目に比べて教科書で扱う実験が多いが、その実験対象が持つ時間・空間スケールが生活感覚とかけ離れている場合も多く、実験対象を生徒に具体的にイメージさせることが難しい(武井, 2016). そのため、暗記に力点が置かれる傾向が助長されている可能性がある.

それを克服するために、例えば、地学基礎の岩石・鉱物の分野において、今までの推奨されてきた偏光顕微鏡による岩石の薄片の観察に代えて、生徒全員が手を動かし岩石の薄片観察を行えるように、予備知識がなくても操作し易いルーペと偏光フィルムを用いた観察の工夫が紹介されている(武井, 2017). 一方、気象分野では学習対象を教室内に持

ち込むことが難しく、代替となる教材を用いる傾向がある. 例えば、酒井(1985)は、高等学校の地学の学習において、標高による気温分布の違いから乾燥断熱減率や湿潤断熱減率の特徴を生徒にイメージさせる工夫を報告している. また、コンピューターによるデータ解析を取り入れたり(例えば、前田ら, 1995)や既習事項の物理法則に基づく考察を取り入れ温帯低気圧に伴う雲分布の特徴を理解させる工夫(岩崎, 2017)などもある. しかし、代替の教材ではなく、可能な限り自然界の現象に近い教材を授業に導入できれば、生徒が気象分野の現象をイメージし易くなるであろう. ここでは、地学基礎において学習する「乾燥断熱減率」を例に、生徒が具体的なイメージを得られるように工夫した実験を提案する.

本論文は、群馬県高等学校教育研究会地学部会と群馬大学教育学部研究科長期研修院(理科教育)が共同で開催している第7回地学合同セミナー(2018年8月17日)で行われた実験の提案をまとめたもの

である。高校の地学担当者が地学教材について議論できる場を設けるのは、単に、地学の教員が研鑽を積むだけが目的ではない。群馬県では地学を専門とする教員が少ないため、他分野を専門とする教員が基礎地学を担当する割合が高い。一方、基礎地学の教科書で使われる用語に注目すると、ゴシック文字で強調されている重要語句の数が教科書会社によって大きく異なり、また、推奨される実験の多さとあいまって、地学を専門としない教員が地学基礎を指導する際に感じる困難さにつながるとされる（武井，2016）。そのため、地学を専門とする教員と専門としない教員との授業情報共有の機会を確保することが重要になる（武井，2013）。この地学合同セミナーでは、地学を専門としない地学担当者にも参加を呼びかけ、毎回、1-2名の参加があり、授業情報共有も行う機会となっている。

## 2. 乾燥断熱減率について

何らかの理由で空気塊が断熱的に上昇すると、上空の気圧が低いため、空気塊は断熱膨張し、周囲の空気に対して仕事をする。その仕事の大きさに対応して、空気塊の温度が低下する。空気塊が下降する場合には、この逆が成り立ち、温度は上昇する。水蒸気の凝結や水の蒸発が起きない「乾燥」した条件での温度変化の割合を乾燥断熱減率（ $\Gamma_d$ ）といい、静力学の方程式、熱力学の第1法則と気体の状態方程式を使って、次の式（1）のように書き表すことができる。

$$\Gamma_d \equiv \frac{dT}{dz} = -\frac{g}{C_p} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $T$ は空気塊の温度、 $z$ は空気塊の位置の鉛直成分、 $g$ は重力加速度、 $C_p$ は乾燥空気（乾燥空気）の定圧比熱である。地球上であれば、その乾燥断熱減率の値は $-0.98^\circ\text{C}/100\text{ m}$ となり、一般には定数として扱われる。太陽系の内外を問わず、断熱的な運動が仮定できる大気を持つ惑星であれば式（1）は成立する。

この乾燥断熱減率は、大気の安定度や雲の形成メカニズムを考える場合に不可欠な基礎知識であるが、

自然状態において、人間は空気塊と一緒に上昇/下降ができないため、乾燥断熱減率を実感することは難しい。多くの気象研究者であっても数式による理解に留まっているであろう。

以下、地学基礎の授業において、この体感できない乾燥断熱減率を生徒がイメージするための方策、つまり、実感を伴う理解に近づけるための工夫を考える。

## 3. 地学基礎の授業における乾燥断熱減率の教授法の工夫

地学基礎の教科書（数研出版）では、第1図の減圧装置を使って、装置内部の気圧を下げ、それに伴う断熱膨張による温度低下を液晶温度計で測定することを推奨している。しかし、この方法では、生徒は気圧の変化を観察できないため、装置内にデジタル気圧計を置き、更に、示度が読み取りにくい液晶温度計の代わりにデジタル温度計を用いて、気圧と温度の変化を定量的に測定できるように工夫した。

この実験を行う際のコツは、デジタル温度計を大きめのビニール袋の中に入れることである。これにより温度変化の値が大きくなる。ビニール袋で閉空間を作ることによって、温度センサー周辺の空気の断熱性が高まるのであろう。



第1図：『新編地学基礎』（数研出版）に掲載されている乾燥断熱減率の原理を確認する実験。



第2図：地学合同セミナーにおける実験風景。

地学合同セミナーでは8名の参加者が実験を行った(第2図)。手動式ポンプで装置内の空気を抜くと、容器内の空気は断熱膨張し、外部に対して仕事をするため、温度が低下する。空気塊(容器)は鉛直方向に運動をしないが、気圧変化に伴い温度が低下する様子を確実に観察できる。

しかし、容器の断熱性が不十分なため、温度が下がった空気には、外部から熱が供給され続ける。そのため、空気の温度は理論値にまで下がることはない。ある班では700 hPaまで気圧を下げ、約4℃の温度低下を確認できた。地上から700 hPa(高度約3.5 km)まで空気塊が断熱的に上昇すると、乾燥断熱減率(−0.98℃/100 m)から、34℃の温度低下が期待される。つまり、観察された温度低下(4℃)は理論値(34℃)の約11%と小さな値となる。

参加者の意見をまとめると、次の3つに集約された。

- ① この実験ならば、気圧の低下に伴い気温が下がる様子を、生徒が授業中に観察できる。
  - ② この実験では、気圧の低下と空気塊の上昇の関係を生徒に説明し難い。生徒は空気塊が上昇したことをイメージするのは難しいだろう。
  - ③ 観測された気温減率は理論値の約10%と小さく、定量的な説明には使えない。
- ①の意見から、この実験装置の有用性が確認できる。
- ②の欠点は、室内で実験する限り、避けられない。
- ③の指摘のような理論値と観測値に大きな差が生じる原因は2つある。第1は、容器の断熱性が不足していることである。容器内の空気が理論通りに冷

えたとしても、プラスチック容器の壁を通して、容器内の空気が外部から加熱される。第2は、温度計の時定数である。乾燥断熱減率に伴う気温変化は小さいため、時定数が大きな(≒熱容量が大きな)センサーを使っていると、記録される気温変化の絶対値は小さくなる。

#### 4. 「乾燥断熱減率」の直接測定の提案

第3章の実験装置は、教室内で手軽に断熱膨張に伴う気温の変化を観察できるが、実験装置内の空気は上昇していないため、空気塊の運動と乾燥断熱減率との関係をイメージし難い。また、手動式ポンプで装置内の空気を抜くのに時間が掛かるため、断熱の仮定が成立しなくなり、測定された温度変化は理論値の約10%と小さい。この欠点を解決するために、群馬県庁の展望エレベーターを利用した乾燥断熱減率を直接測定する実験を提案する。

ここで提案する実験装置は、著者の1人(岩崎)が担当する学部授業・地学実験Bで用いている装置を、新たに改良したものである。まず、プロトタイプの実験装置について説明する。

##### 4-1) 改良前の乾燥断熱減率測定装置

###### a) 装置と実験の概要

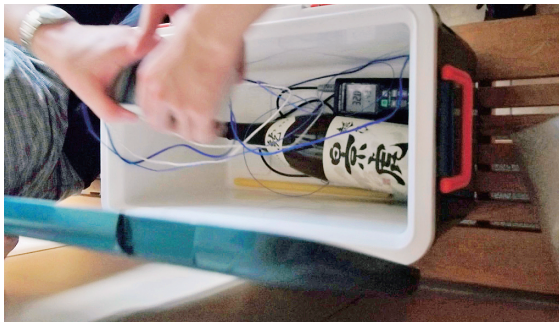
実験装置を第3図に示す。空気が自由に移動できる大きさの穴を開けたゴム栓で、一升瓶の口を閉める。その穴から精密温度計(第1表)のセンサーの感温部を一升瓶に差し込み、日射を避けるため一升瓶を断熱性の高いクーラーボックス(27ℓ)の中に格納する。

第1表：改良前の乾燥断熱減率測定装置の使用した温度計の諸元

データロガー：	日機装サーモ社製 N543 データロガー
プローブ：	日機装サーモ社製 フレキシブルPVCチップ
精 度：	0.02℃
時 定 数：	30-60 秒(空气中)



群馬県庁の展望エレベーターに、この装置を持ち込み、実験を行う。展望エレベーターは90秒間で高度差110mを上昇/下降するため、この昇降に伴い一升瓶の中の空気は膨張/圧縮され、乾燥断熱減率にしたがい空気の温度が変化する。その温度変化は温度計のデータロガーに記録される。乾燥断熱減率の値は $-0.98^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ であるから、展望エレベーターの上昇/下降に伴い、理論上は、 $1.1^{\circ}\text{C}$ の温度変化が期待される。



第3図：改良前の乾燥断熱減率測定装置。

#### b) 地学実験Bにおける実験の目的

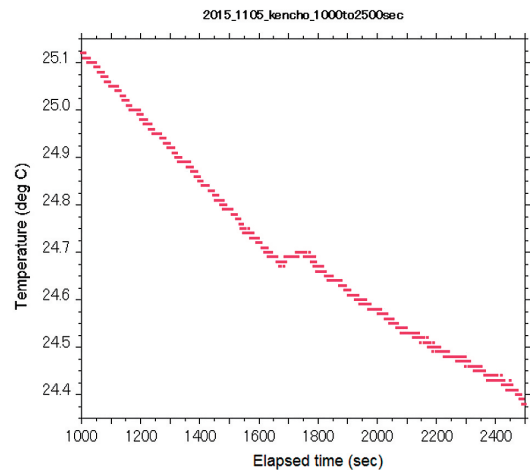
後述するように、この装置ではエレベーターの上昇/下降に伴い約 $0.1^{\circ}\text{C}$ の変化しか観測されない（第4図）。地学実験Bの授業では、これを逆手にとり、観測値が理論値と同じにならない理由を学生に考えさせている。つまり、この測定装置は、観測値が理論値と大きく異なることが重要なので、今回のテーマである乾燥断熱減率を実感する教材としては不向きなものである。

#### c) 測定結果

観測結果の一例を第4図に示す。展望エレベーター内の温度が測定装置よりも低かったため、時間と共に、測定装置の温度は線形的に下がっている。経過時間1,650-1,750秒の間に展望エレベーターは110mを下降し、その間に $0.06^{\circ}\text{C}$ の温度上昇が記録されている。温度低下のトレンド（ $-0.7^{\circ}\text{C}/1,400$ 秒）を補正すると、約 $0.1^{\circ}\text{C}$ の温度上昇に相当する。その温度変化は理論値の10%未満であり、第3章の実験装置と同じように、実験者は乾燥断熱減率を

実感することは難しい。

記録された温度変化が小さい理由は、センサーの防水加工に使われた被覆材質とサーミスター自体の熱容量が大きいためである。仮に、乾燥断熱減率にしたがって空気の温度が $1^{\circ}\text{C}$ 上昇していたとしても、正確な温度変化は記録できない。



第4図：改良前の乾燥断熱減率測定装置で観測された温度変化（2015年11月5日）。

### 4-2) 改良後の乾燥断熱減率測定装置による測定結果

#### a) 実験装置と実験の概要

記録される温度変化を大きくし、乾燥断熱減率を目で確認できるようにするために、2つの工夫を行った。

第1の工夫は時定数の小さな温度計を使うことである。矢野（1985）のように微小温度を測定できるようなタングステンの $0.01\text{ mm } \phi$ 線を用いた抵抗温度計を自作する方法もあるが、技術と経験が求められる。ここでは、市販されている熱電対温度計（TM-947SDJ）を用いた（第2表）。しかし、TM-947SDJに付属する素線温度センサー TP-300（800円）では、記録される温度変化が小さいため、センサーはTJK-CN32VP（6,000円）を用いた。2つのセンサーの感温部には防水加工が施されているが、その被覆材質・厚さの違いが、時定数の違いの主な原因であろう。特別注文すれば感温部が「ムキ出し」のセンサーも作製してもらえる。それを使え



ば、より大きな温度変化を記録できるであろう。

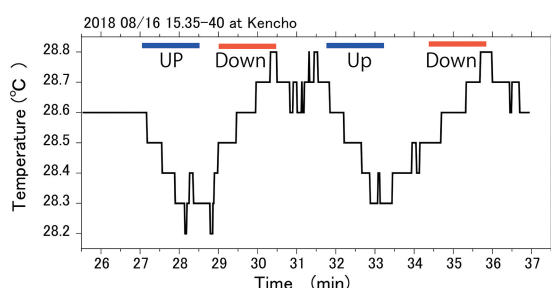
第2の工夫は、一升瓶の代わりに、ビニール袋（20ℓ）を用いたことである。ビニール袋に代えると記録される温度変化は明らかに大きくなる。一升瓶の比熱（ガラス： $\sim 840 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ）に比べて、ビニール袋の比熱（ポリエチレン： $1,200 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ）は大きい、全体の質量が15gと小さいため、熱容量は小さくなる。このことが、大きな温度変化が記録できる原因であろう。

第2表：改良後の乾燥断熱減率測定装置で  
使用した温度計の諸元

データロガー：	佐藤商事社製	TM-947SDJ
プローブ：	佐藤商事社製	TJK-CN32VP
精 度：	0.6 $^\circ\text{C}$	
時 定 数：	ごく短時間（メーカ担当者談）	

## b) 測定結果

改良後の乾燥断熱減率測定装置を使った測定結果を第5図に示す。「Up」と「Down」は、それぞれ、エレベーターが上昇と下降している時間帯であり、それに対応して、温度の低下と上昇が記録されている。



第5図：改良後の乾燥断熱減率測定装置で観測された温度変化。「Up」と「Down」はエレベーターが上昇と下降している時間帯を示す。

温度変化は0.4 $\sim$ 0.6 $^\circ\text{C}$ と大きく、乾燥断熱減率の35-55%に相当する。第6図の様に、熱電対温度計の表示部をクーラーボックスの外に出しておけば、エレベーターの上昇/下降に伴う温度変化をリアルタイムで確認でき、空気塊の上昇と下降に伴う気温変化を実験者は実感できる。



第6図：測定時の様子。

## 5. まとめと地学基礎への応用

地学基礎で学習する現象の多くは、その対象が持つ時間・空間スケールが生活感覚とかけ離れているため、具体的に生徒がイメージすることが難しい。ここでは、「乾燥断熱減率」を例に、生徒が具体的なイメージを得られるように工夫した実験を提案した。

第4章で述べた改良後の乾燥断熱減率測定装置を使えば、空気塊の上昇と下降に伴う気温変化を目で確認できる。しかし、地学基礎の受講生全員が群馬県庁に出向くことは不可能である。そこで、次の利用法が考えられる。

- 1) 第3章の装置を使い、生徒全員が「乾燥断熱減率の原理」を確認する。
- 2) その実験のあとに、改良後の乾燥断熱減率測定装置を使った実験の様子の動画を見せ、エレベーターの上昇/下降に対応して、空気塊の温度が低下/上昇することを確認する。

このように教科書で推奨されている実験に工夫を加えたとともに、エレベーターの上昇/下降に伴い温度が低下/上昇している動画を組み合わせることで、空気塊の運動と乾燥断熱減率との関係を生徒がイメージし易くなると期待される。

**謝辞** 乾燥断熱減率を測定する実験の一部は、2016年度の大学院授業・理科内容研究O（地学）でも行

い、受講者の茂木君と鈴木君の意見も装置改良の参考にしました。また、地学合同セミナーは、群馬大学教育学研究科長期研修院（理科教育）の活動の一環として行われました。それぞれの関係者に感謝いたします。

#### 参考文献

- 岩崎博之, 2017: 温帯低気圧周辺の雲分布の特徴についての教授法, 群馬大学教育実践研究, **34**, 39-45.
- 酒井光隆, 1985: 体験を生かした気象学習の実践例 高等学校「大気と水の循環」, 理科の教育, **34**, 42-45.
- 武井伸光, 2013: 地学を専門としない教員との授業情報共有. 第43回関東理科教育研究発表会, 研究発表資料, 地学分科会 No. 9.
- 武井伸光, 2016: 改訂前後の「地学基礎」教科書の比較検討. 第46回関東理科教育研究発表会, 研究発表資料, 地学分科会 No. 1.
- 武井伸光, 2017: (偏光顕微鏡ではなく) ルーペと偏光フィルムを用いた薄片観察. 第47回関東理科教育研究発表大会 研究発表資料, 地学分科会 No. 8.
- 長崎栄三, 2014: 日本の戦後教育の変遷と課題. 科学技術リテラシーに関する課題研究報告書, 93-120.
- 前田健悟, 丸山 修, 三島嶽志, 1995: コンピュータを利用した気象学習用教材. 熊本大学教育実践研究, **12**, 49-55.
- 松森靖夫, 一瀬絢子, 2015: 月に対する小学校教員志望学生の認識状態の分析. 理科教育学研究, **56**, 271-277.
- 矢野淳滋, 1985: 微小温度差計を用いた実験, 物理教育, **34**, 115-119.